

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

18

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-271230
 (43)Date of publication of application : 18.10.1996

(51)Int.Cl.

G01B 11/14

(21)Application number : 08-024243

(71)Applicant : ZYGO CORP

(22)Date of filing : 09.02.1996

(72)Inventor : DE GROOT PETER

(30)Priority

Priority number : 95 408907 Priority date : 22.03.1995 Priority country : US
 95 522570 01.09.1995

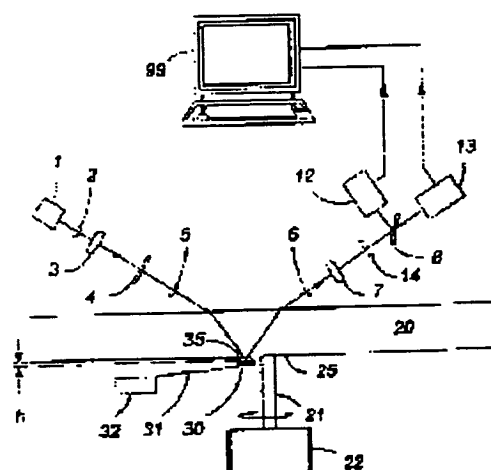
US

(54) METHOD AND DEVICE FOR MEASURING OPTICAL GAP

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To measure the gap length between two members, where one is clear, with high speed and precision.

SOLUTION: A polarized beam 5, passed through a polarizing member 4, is directed diagonally toward the surface 25 of a clear member, and made to pass through a clear member 20, and then based on the combining effect of the reflections both from the surface 25 of the clear member and the surface 35 of an object, polarized components of reflected vector (s) and vector (p) in reflected beam 8 are made to interfere with each other, and with the use of a polarization sensing level meter 12 and a phase detector 13, light intensity of polarized components and relative phase are measured, and based on the measured information, the distance between the surface 25 of the clear member and the surface 35 of the object is decided with a computer 99.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
 examiner's decision of rejection or application converted
 registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of
 rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of
 rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-271230

(43) 公開日 平成8年(1996)10月18日

(51) Int.Cl.⁶
G 0 1 B 11/14

識別記号 庁内整理番号

F I
G 0 1 B 11/14

技術表示箇所
G

審査請求 未請求 請求項の数39 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平8-24243

(22) 出願日 平成8年(1996)2月9日

(31) 優先権主張番号 08/408907

(32) 優先日 1995年3月22日

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(31) 優先権主張番号 08/522570

(32) 優先日 1995年9月1日

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 591102073

ジゴー コーポレーション

ZYGO CORPORATION

アメリカ合衆国 カネチカット州 06455

-0448、ミドルフィールド、ローレル プ

ルック ロード (番地なし)、ポスト

オフィス ボックス448

(72) 発明者 ピータ デ グルース

アメリカ合衆国 カネチカット州 06457、

ミドルタウン、ローレル グROUP ロード

355

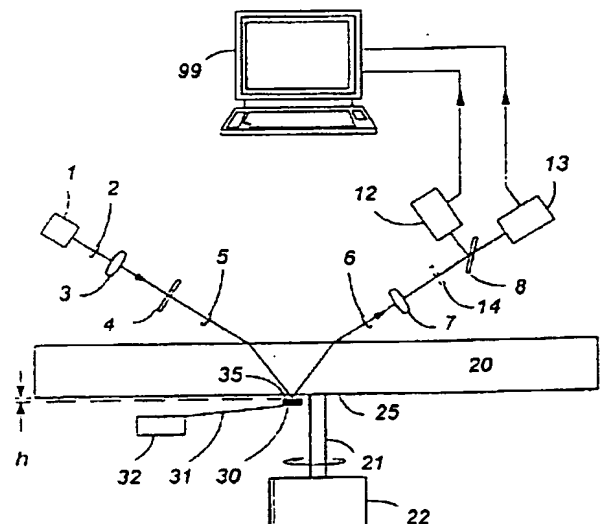
(74) 代理人 弁理士 野河 信太郎

(54) 【発明の名称】 光学的隙間測定方法および装置

(57) 【要約】

【課題】 一方が透明な2つの部材の隙間の距離を高速度および高精度で測定する。

【解決手段】 偏光部材を通した偏光光ビームを透明な部材の表面に斜角で向け、透明な部材を通過させて透明な部材の表面からの反射と被験物体の表面からの反射の組み合わせ効果によって偏光ビームを反射させ、反射ビーム中における反射されたベクトルsとベクトルpの偏光成分を互いに干渉させて、偏光感知強度計と位相検出器で偏光成分の光強度と相対的位相を測定し、測定した情報に基づいてコンピュータにより透明な部材の表面から被験物体の表面までの距離を決定する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 実質的に透明な部材の表面からそれに極めて近接した被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定方法であって、

関連する直交基準ベクトル s を有する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有し、前記透明な部材の表面に入射しかつ s 型および p 型の偏向が双方に存在するような偏向を有する偏光ビームを前記透明な部材の表面に斜めの角度で向ける工程と、

前記透明な部材を通過させて前記偏光ビームを反射させ、互いの相対的な位相とそれに関連する振幅とを有するベクトル s とベクトル p の偏光成分からなる反射ビームを得る工程と、

前記反射ビーム中における反射されたベクトル s とベクトル p の偏光成分を互いに干渉させて前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、

前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報に基づいて前記透明な部材の表面から前記被験物体の表面までの距離を決定する工程とからなる光学的隙間測定方法。

【請求項2】 前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面とが、実質的に透明な媒体によって分離されている請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項3】 前記透明な部材の表面から前記被験物体の表面までの測定距離が、前記光ビームの光の1波長よりも短い請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項4】 前記偏光ビームを反射させる工程が、透明な部材の表面からの反射と被験物体の表面からの反射との組み合わせ効果によって前記偏光ビームを反射させる工程からなる請求項3記載の光学的隙間測定方法。

【請求項5】 前記被験物体の表面が、前記透明な部材の表面に対して静止している請求項4記載の光学的隙間測定方法。

【請求項6】 前記被験物体の表面が、前記透明な部材の表面に対して動いている請求項4記載の光学的隙間測定方法。

【請求項7】 前記偏光ビームを反射させる工程が、透明な部材の表面からの反射と被験物体の表面からの反射との組み合わせ効果によって前記偏光ビームを反射させる工程からなる請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項8】 前記被験物体の表面が、前記透明な部材 * 40

$$\theta(\beta) = \arg[z_s(\beta)] - \arg[z_o(\beta)] + \xi$$

〔式中、 $z_s(\beta)$ 、 $z_o(\beta)$ はともに被験物体と透明な部材の表面とで得られた有効反射率、 ξ は $\xi = \arg(a_s'') - \arg(a_o'')$ で表される値で、この a_s'' 、 a_o'' は s および p の偏光についての入射光ビームの電場成分、 $\beta = \beta = 2k h \cos(\phi)$ で表される値で、この k は光源の角波数、 h は透明な部材の表面から被験物体の表面までの距離、 ϕ は光源の入射角である〕で表される請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項15】 実質的に不透明な部材の表面からそれ

*の表面に対して静止している請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項9】 前記被験物体の表面が、前記透明な部材の表面に対して動いている請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項10】 前記光ビームの光の波長にほぼ等しいかあるいは光ビームの光の波長よりも実質的に大きい範囲にわたって前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離を変化させる工程と、

10 前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報の最大値と最小値を得るために、前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離が変化している間に前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、前記最大値と最小値とに基づいて前記被験物体の表面の有効な合成屈折率を決定する工程とをさらに備えてなる請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項11】 前記得られた最大値と最小値を記憶し、記憶した値から前記有効な合成屈折率を決定する工程をさらに備えてなる請求項10記載の光学的隙間測定方法。

【請求項12】 前記被験物体の表面の境界に対して、前記被験物体の表面上の入射光ビームの位置をモニターする工程をさらに備えてなる請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項13】 前記モニターする工程が、垂直な入射角度で実質的に前記透明な部材の表面に顕微鏡を通して向けられた第2の光源を提供する工程と、その顕微鏡を通して提供された光を前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面から反射させ、その反射された光の像をカメラ手段上に形成して、前記被験物体の表面の境界を観察することを可能とする工程と、

前記顕微鏡を通して前記カメラ手段上に前記入射光ビームの少なくとも一部の像を形成して、前記被験物体の表面上の入射光ビームの位置を観察することを可能とする工程と、

前記被験物体の表面の境界に対して、前記画像化された入射光ビームの位置を観察する工程とからなる請求項12記載の光学的隙間測定方法。

【請求項14】 前記相対的な位相の差が式

に極めて近接した実質的に透明な被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定方法であって、関連する直行基準ベクトル s を有する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有し、前記透明な被験物体の表面に入射しかつ s 型および p 型の偏向が双方に存在するような偏向を有する偏光ビームを前記透明な被験物体の表面に斜めの角度で向ける工程と、

前記透明な被験物体を通過させて前記偏光ビームを反射させ、互いの相対的な位相とそれに関連する振幅とを有

するベクトル s とベクトル p の偏光成分からなる反射ビームを得る工程と、

前記反射ビーム中における反射されたベクトル s とベクトル p の偏光成分を互いに干渉させて前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、

前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報に基づいて前記不透明な部材の表面から前記透明な被験物体の表面までの距離を決定する工程とからなる光学的隙間測定方法。

【請求項16】 前記不透明な部材が、回転する磁気記憶媒体からなり、前記透明な被験物体が、前記回転する磁気記憶媒体の表面上にあるスライダからなり、それによって前記磁気記憶媒体の表面上におけるスライダの空気力学的飛行特性を予測する請求項15記載の光学的隙間測定方法。

【請求項17】 前記不透明な部材の表面から前記透明な被験物体の表面までの測定距離が、前記光ビームの光の1波長よりも短い請求項15記載の光学的隙間測定方法。

【請求項18】 実質的に透明な部材の表面からそれに極めて近接した被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定装置であって、
直行基準ベクトル s に関連する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有する偏光された入射光ビームであり、前記 s 型と p 型との双方の偏向が存在し、前記透明な部材を通過して反射されて、 s と p の反射偏向成分からなる前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面との合成反射率を有する反射ビームとなっており、その合成反射率が偏向状態に応じて変化し、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化が前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離の関数となるような偏光された入射光ビームを斜めの角度で前記透明な部材の表面に向けて与える手段と、
前記反射ビームの偏向成分を混合してその偏向成分の相対的な強度と前記 s と p の偏向成分間の位相差との干渉効果特性を得ることで、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報を得る手段と、
前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報に基づいて前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離を決定し、それによって前記透明な部材の表面から前記被験物体の表面までの距離を高速かつ正確に測定することを特徴とする光学的隙間測定装置。

【請求項19】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記偏光成分を混合する偏光部材を備えてなる請求項18記載の光学的隙間測定装置。

【請求項20】 前記偏光部材が、珪灰石プリズム (Wollaston prism) 状の手段からなる請求項19記載の光

学的隙間測定装置。

【請求項21】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記強度を測定する光検出手段をさらに備えてなる請求項19記載の光学的隙間測定装置。

【請求項22】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記 s 及び p の偏光成分の相対的な位相をシフトさせる位相シフト手段と、位相がシフトされた偏光成分を互いに垂直に偏光させた1組の光ビームに混合して2つの偏光の相対的な強度の干渉効果特性を得る手段とをさらに備えてなる請求項21記載の光学的隙間測定装置。

【請求項23】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記混合された位相シフト偏光成分の強度を測定する光検出手段をさらに備えてなる請求項22記載の光学的隙間測定装置。

【請求項24】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記反射された光ビームの各偏光の光量を測定する偏光感知強度計手段と、前記 s 及び p の偏光間の位相差を決定する位相検出手段と、前記反射された光ビームを偏光感知強度計手段と位相検出手段に向けた2つの光ビームに分割するビームスプリッター手段とからなる請求項18記載の光学的隙間測定装置。

【請求項25】 前記反射された光ビームの偏光成分を混合して前記位相差と強度の情報を得る手段が、前記反射された光ビームの各偏光の光量を測定する偏光感知強度計手段と、前記 s 及び p の偏光間の位相差を決定する位相検出手段と、前記反射された光ビームを偏光感知強度計手段と位相検出手段に向けた2つの光ビームに分割するビームスプリッター手段とからなり、
前記位相検出手段が、前記偏光部材と、前記光検出手段と、前記位相シフト手段とからなる請求項23記載の光学的隙間測定装置。

【請求項26】 前記被験物体の表面に対して配置され、被験物体の表面上における測定点の位置を決定する顕微鏡手段をさらに備えてなる請求項18記載の光学的隙間測定装置。

【請求項27】 前記偏光された入射光ビームを得る手段が、光源と、その光源からの光が通過する偏光部材とからなる請求項18記載の光学的隙間測定装置。

【請求項28】 前記偏光部材が、ダイクロイック直線偏光子状の手段からなる請求項27記載の光学的隙間測定装置。

【請求項29】 前記光源が、レーザー手段からなる請求項27記載の光学的隙間測定装置。

【請求項30】 前記光源が、光照射ダイオード手段からなる請求項27記載の光学的隙間測定装置。

【請求項31】 前記光源が、放電ランプ手段からなる

請求項27記載の光学的隙間測定装置。

【請求項32】 実質的に不透明な部材の表面からそれに極めて近接した実質的に透明な被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定装置であって、
 直行基準ベクトルsに関連する偏光基準ベクトルpを形成する入射平面を有する偏光された入射光ビームであり、前記s型とp型との双方の偏向が存在し、前記透明な被験物体を通過して反射されて、sとpの反射偏向成分からなる前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面との合成反射率を有する反射ビームとなって、その合成反射率が偏向状態に応じて変化し、前記sとpの偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化が前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離の関数となるような偏光された入射光ビームを斜めの角度で前記透明な被験物体の表面に向けて与える手段と、
 前記反射ビームの偏向成分を混合してその偏向成分の相対的な強度と前記sとpの偏向成分間の位相差との干渉効果特性を得ることで、前記sとpの偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報を得る手段と、

前記sとpの偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報に基づいて前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離を決定し、それによって前記不透明な部材の表面から前記透明な被験物体の表面までの距離を高速かつ正確に測定することを特徴とする光学的隙間測定装置。

【請求項33】 前記不透明な部材が、回転する磁気記憶媒体からなり、前記透明な被験物体が、前記回転する磁気記憶媒体の表面上にあるスライダからなる請求項32記載の光学的隙間測定装置。

【請求項34】 前記被験物体の表面を投光照明して、前記被験物体の表面の境界に対する測定点の正確な位置づけを可能にする工程をさらに備えてなる請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項35】 前記光ビームの光の波長にほぼ等しいかあるいは光ビームの光の波長よりも実質的に大きい範囲にわたって前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離を変化させる工程と、
 前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離が変化している間に前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、
 前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報に基づいて前記被験物体の表面の有効な合成屈折率を決定する工程とをさらに備えてなる請求項1記載の光学的隙間測定方法。

【請求項36】 前記透明な被験物体の表面を投光照明して、前記透明な被験物体の表面の境界に対する測定点の正確な位置づけを可能にする工程をさらに備えてなる請求項15記載の光学的隙間測定方法。

【請求項37】 前記光ビームの光の波長にほぼ等しいかあるいは光ビームの光の波長よりも実質的に大きい範囲にわたって前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離を変化させる工程と、

前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離が変化している間に前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、

前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報に基づいて前記透明な被験物体の表面の有効な合成屈折率を決定する工程とをさらに備えてなる請求項15記載の光学的隙間測定方法。

【請求項38】 前記透明な被験物体の表面を投光照明する工程が、インライン光学システムによって透明な被験物体の表面を投光照明する工程からなる請求項36記載の光学的隙間測定方法。

【請求項39】 前記被験物体の表面を投光照明する工程が、インライン光学システムによって被験物体の表面を投光照明する工程からなる請求項34記載の光学的隙間測定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、片方が実質的に透明な部材である2つの部材の表面間（隙間）の距離を測定する高速で高精度な方法および装置に関する。特に偏光と干渉計測定法を用いてこの測定を行う方法および装置に関する。

【0002】

【従来の技術および発明が解決しようとする課題】2つの部材の表面間（隙間）のわずかな距離の正確な測定方法は、産業上の検査および品質管理の面で頻繁に問題になる。それは、例えば磁気データ記憶システムにおいてスライダ装置の性能を確かめるため、高速回転している硬質ディスクにほぼ接しているスライダ装置の浮上高を測定するのに必要である。ここで用いる浮上高とは、磁気ヘッドポールと回転硬質ディスクとの距離のことである。例えば1974年12月17日発行のエム・エフ・ガルニラの米国特許第3,855,625号を参照。この浮上は硬質ディスクの回転によって生じる空力学的効果によって生じる。浮上高はスライダの設計によるが、一般に250nm（10μインチ）未満で、わずかに数十ナノメートルのこともある。この分野では浮上高は非常に低く、すなわち25ナノメートル以下になる傾向がある。スライダ製造業者1社で毎月20万から50万のスライダ装置を生産するのが典型であることから測定の手間と信頼性は特に重要である。

【0003】スライダ装置の浮上高を測定する従来の装置と方法は、ビー・ブッシュンの「磁気記憶装置の摩擦学と力学（Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices）」（ニューヨーク：スプリングerverlag（Springer-Verlag）、1990年）の765～

797頁に開示されている。最近の開発状況は「IDEMAサブ2-マイクロインワークショップ会報 (Proceedings of the IDEMA Sub 2-micro inch Workshop)」(1993年5月12日)に記載されている。

【0004】光学浮上高試験器 (OFHT) はほぼ様に干渉計測定法が基本となっている。干渉計とは物体までの距離、物体の形状や物理的な長さに関係する物理的パラメーターを測ることができるものである [例えばダニエル マラカラ編「光学工場試験法 (Optical Shop Testing)」第2版 (ウィリー (Wiley)、ニューヨーク、1992年) の第1章を参照]。光学技術の基本的な問題点の1つはスライダーABSと実際のハードディスクとの境界の隙間 (境界隙間) が直接に検査できないことである。したがって、基本的に2つの異なるタイプのOFHT、すなわち実際のディスク上に浮上しているスライダーの裏面を相対的に測定するものと、実際のハードディスクの代用に透明なガラスを用いるものとがある。

【0005】第一の種類のOFHTの例がエル、ワイ、チュ、ケイ、エフ、ハラマセックおよびディー、ビー、ボギーによる論文「レーザー干渉計によるヘッド/ディスク間隔の測定 (Measurement of head/disk spacing with a laser interferometer) (IEEE Trans. Magn., MAG-23, 2739, 1988年) に提供されている。開示された装置はスライダーの裏面上の複数の点、すなわちスライダーのディスクに近接しない側にある複数の点の物理的位置を測定できるヘテロダイン干渉計である。この装置の利点は実際の磁気ハードディスクで機能すること、浮上しているスライダーの高さだけでなく配向 (ピッチとロール) も測定できることである。ゼロ浮上高の較正 (calibration) はディスクにスライダーを着地させて行う。この種のシステムの主な欠点はスライダー/ディスクの境界の隙間を直接観測せず浮上高をスライダーの裏面の位置から推測するしかないことである。そのためスライダーの厚さとABSの形状が一定であると仮定しなければならないが、実際には浮上中の機械的応力や熱応力のためスライダーはかなり歪むことがある。もう一つの欠点は現在スライダー装置の製造時において多くの場合スライダーの裏面に近づけないことである。

【0006】干渉計測定手段によるスライダー/ディスクの境界の隙間を直接測定する方法は論文「潤滑における幾つかの問題を解決するための方法提案 (A proposed method for solving some problems in lubrication)」(ザ コモンウェルス エンジニア (The Commonwealth Engineer) (1921年11月および1921年12月) でダブリュー ストーンによって初めて報告された。ストーンが1921年に磁気記憶媒体を研究していなかったのは明らかであるが、本質的な概念は現在の大多数のOFHTの基礎にある概念と同じである。スト

ーンの装置は水平面で回転するよう備え付けられた直径約125mmのガラスディスクからなる。スライダーと実質的に同じ機能をもつ15mm×15mmのブロックを適切なローディング機構を用いてディスクの下面に押し付ける。ディスクが透明なのでブロックの浮上中にディスクを通してブロックを見ることができる。ブロックには、予定の目的のためにほぼ単色光、非偏光光源として作用するナトリウム光をディスクを通して照射する。反射光ビームは、ディスクの表面から反射する光ビームとブロックから反射する光ビームとの組み合わせで構成されている。これらの2つの反射光ビームの組合せと同時に検光によってブロックのディスク上方の浮上高に関連する干渉効果が生じる。ブロックとディスクとの間隔ならびにブロックの配向をディスクの速度を変化させた時の干渉縞の観察から推理する。

【0007】スライダー/ディスクの境界の隙間を直接測定する現在市販されているOFHTはストーンが発明した装置と同じ物理原理の多くに基づいていて、それらの違いはおもに光源、検出器、データ処理手段の型にある。透明な代用ディスクが磁気ハードディスクの代替となり、スライダーABSでの干渉効果によって浮上高情報が得られる。従来のこのタイプのOFHTはすべて、ディスクを通して実質的に垂直入射角でABSに照射し、偏光に関係しない反射強度の変化を検出する。

【0008】ある型のOFHTは、例えばジー、エル、ベスト、ディー、イー、ホーン、エイ、チウおよびエイチ、サスナーによって論文「スライダー動力学の高精度光学測定 (Precise optical measurement of slider dynamics)」(IEEE Trans. Magn. MAG-22, (1986) 1017-1019) に開示があるように、実質的に単色光である光源を用いる。反射光はディスクとスライダーABS間の薄膜効果によって変調される。この変調は浮上高について周期的で光源照明の波長の2分の1に等しい周期をもつ。適切な検出および分析手段を導入することで反射光の強度の変調を観察し浮上高の変化を追うことができる。変調曲線のある部分に対し反射強度を検出することによってABSとディスク間の隔たりを妥当な正確さで測定することができる。もともとはこのような装置は純粋に目に見える縞の解析に関するものであった。ジェイ、エム、フライシャーとシー、リンは論文「空気圧分離を測定する赤外線レーザー干渉計 (Infrared laser interferometer for measuring air-bearing separation)」(IBM研究開発報 (IBM Journal of Research and Development)、18(6)、1974年、529~533頁) という論文で記載されたように、単色OFHTに光電センサーを初めて使用した。さらに新しい単色光OFHTの例が、ティ、オオクボとジェイ、キシガミによって論文「レーザー干渉計測定法を用いるガス潤滑スライダーベアリング分離の正確な測定 (Accurate Measurement of Gas-L

ubricated Slider Bearing Separation using Laser Interferometry)」[Trans. ASME, 110巻148～155頁(1988年1月)]に記載されている。この論文は、プロクイップ社(ProQuip, Inc.)によって米国で販売されている浮上高試験器FM8801およびFM2000の操作の原理を記載したものである。

【0009】測定が周期現象に依存しているという点で単色光OFHTの欠点は何の干渉サイクルが測定されるか明らかでないことにある。その結果、曖昧さが存在し、浮上高測定は波長の4分の1に等しい範囲、すなわち典型的には150nm未満の範囲に限られる。さらに問題なのはかなりの範囲の浮上高で測定の感度がほぼゼロになることである。測定方法のこの面はスライダとディスク間の隔たりが25nm以下の場合、特に厄介なものである。最後に製品試験においてゼロ浮上高にシステムの較正をするためにスライダーごとに着地させる必要があるかも知れない。

【0010】エイ・ナイアガムによる論文「サブミクロン精度の空気圧分離測定のための可視レーザー干渉計

(A Visible Laser Interferometer of Air Bearing Separation measurement to Submicron Accuracy)」[Trans. ASME, 104巻、60～65頁(1982年)]に、干渉計の縞の順序を測定する追加手段も提供する単色光に基づいたOFHTが記載されている。この追加手段はキセノンランプおよび円形可変波長フィルターからなる。ランプと波長フィルターは共に400～700nmの範囲の同調型波長光源として機能する。波長が変化するにつれて干渉パターンも変化し絶対浮上高を表し、単色光測定のための縞の順序を表す。縞の順序が測定されると次に測定は約2.5kHzの速度で単色センサーの測定に進む。

【0011】その他の従来技術には多様な波長を含めることで単色干渉測定法の曖昧性という問題点を避けるものが幾つかある。例えば、ディー・エイ・フリッジらへの米国特許第4,593,368号に示されるように、照明の波長との干渉効果の変化に基づく一般型のOFHTがある。この特許の装置はスライダー/ディスクの境界の隙間から反射する白色光の波長依存変調を分析するコンピュータ化した分光光度計からなる。この技術はカリフォルニア州チャツワース(Chatsworth)のパシフィックプレジジョンラボラトリーズ社が以前生産していた自動デジタル浮上高試験器のような市販の製品に組み込まれている。分光変調現象が浮上高について周期的でないため、白色光干渉測定法には測定に曖昧性がないという重要な利点がある。しかしながら分光計に基づいた白色光法には数多くの限界があり、最も厳しく手に負えない限界は測定速度である。この問題は171もの異なる波長について反射時の位相変化を埋め合わせる必要によって倍加する[例えばアール・パブラットによる論文「浮上高測定システムとスライダー吸収(Flying

height measurement systems and slider absorption)」「IDEMA インサイト(Insight)7

(5)、1頁(1994年)参照。最後に白色光技術は使用される最低波長の2分の1より(すなわち約200ナノメートル)大きい隔たりに非常に効果的であるが、浮上高は25nm未満になる傾向がある。

【0012】上記の白色光干渉測定法の限界の幾つかを克服するため少数の離散波長を用いて速度と性能を改善した従来のOFHTがある。シー・レイシーへの米国特許第5,280,340号には多様な波長を放射する高強度の光源と高速分光分析のための検出装置とからなる、わずかな間隔を光学的に分析する3波長方法が記載されている。この検出装置には波長弁別ビームスプリッター、測定する個々の波長のためのフィルター及び各波長のための高速光検出器が含まれる。開示された装置には検出装置からヘッドをごくわずか、約0.25μm遠ざけるために用いる機械装置も含まれる。この機構は装置の較正のために必要で、各波長の最大および最小強度測定のためにスライダーを部分的に降ろして2つ以上の波長の強度測定をすることに関わる。システムの見盛りを行えば、100kHz以上の速度で浮上高を測定することができる。この特許に開示された装置はフェーズメトリックス(Phase Metrics)が製造している力学的浮上高試験器の原理になっている。

【0013】3波長OFHTは古い白色光装置より格段に早い、多くの同じ限界を共通して持っている。その最も重大ものは浮上高がゼロに近づくに従って測定感度がゼロに近づくことである。これらの限界は主にいろいろな波長について垂直入射角での反射強度の変化に依存していることに関連している。浮上高が小さい場合これらの変化を測定するのは極端に難しくなることがある。したがって、垂直入射角での強度測定に対する依存が上記の従来のOFHT技術すべてが持つ欠点になっている。

【0014】低浮上高での測定の難しさは、スライダーABSからの反射とディスク表面からの反射を何らかの方法、偏光または光ビームの物理的分離、またはその両方によって分けることができれば大きく避けられる。公知のジー・ソマーグレンへの米国特許第4,606,638号に開示の装置は前面偏光子として透明ディスクを用いてこの表面からの反射をABSからの反射から区別する。開示されたこの装置の追加の利点は複数の検出器を有するカメラによって隔たり全体を測定することによってスライダーの形状と配向、並びに複数の測定点が必要なその他の所要パラメータを測定できることである。しかしながら、ソマーグレン特許に示されているような偏光被覆を施した特殊透明ディスクの製造は非常に経費がかかり表面に傷でもあれば低浮上高で問題を引き起こすことがある。

【0015】光学浮上高試験器で干渉光ビームを分離す

る別の方法が公知のジー・ソマーグレンへの米国特許第5, 218, 424号に開示されている。この装置は直行偏光を有する2つの平行光線を用いるものである。この2つの光線はガラスディスク表面にブルースター角で入射し、一方の光線が反射せずにディスクを完全に通り返け、もう一方がディスクの表面から一部反射する。反射せずにディスクを通り抜けた光線はABSに照射するのに使われる。次に2つの光線を再結合させ浮上高に対して正弦に (sinusoidally) 変化する干渉効果を生じる。この特許で示された装置は2光線干渉計であるから、感度や精度を損なうことなく非常に小さい隔たりを測定し、隔たり内の多数の反射光によって直接生ずる干渉効果に依存するシステムの主な欠点の1つを除くことができる。開示された装置はABS全体の像を撮るアレーカメラも含んでいる。

【0016】これらの利点にかかわらず、公知の米国特許第5, 218, 424号に開示された方法と装置は、磁気記憶装置産業で用いられるスライダーの浮上特性の自動検査として実用的でなく、以下のような重要な問題がある。すなわち、高価で複雑な高速位相変調器を不可欠の構成部品として使用すること、位相変調方法および透明ディスクのフル回転中に統合する必要性が原因となっている約15Hzの非常に遅いデータ取得および処理速度、すべての測定に全フレーム画像カメラを使用することが原因となっているスライダーの力学的浮上特性測定の遅さ、透明ディスクの不均一性や歪みに対する有害な感受性、浮上高測定の実質的なエラーに通じるディスクのチップ (tip) とチルト (tilt) に対する有害な感受性、主に高速変調器の存在が原因である曖昧な位相のオフセットが生じる干渉相の全体的ドリフト (drift) 等である。

【0017】公知の米国特許第5, 218, 424号で開示された装置の欠点の幾つかは、同時係属中の1995年1月31日付米国特許出願第08/38, 232号「回転ディスク表面に対する物体の表面の距離を測定する干渉計と方法 (Interferometer and Method for Measuring the Distance of an Object Surface with Respect to the Surface of a Rotating Disk)」で扱っている。この出願に示されている主な改良点は以下のとおりである。ディスクの量、表面構造および配向の変化に係わる望ましくない細部に煩わされずに高速操作が可能な補償 (compensation) 光線の導入、高速の位相測定システム、スライダー表面上の様々な点に対応する複数の点における位相のサンプリングを超高速で効果的に行う方法と手段を提供する。これらの利点にもかかわらず、この米国特許出願第08/38, 232号の装置は空気の流れや光学的構成部材の機械的な動きのような、位相ドリフトの原因の幾つかに対しまだ敏感である。最も深刻なのは、非常に複雑で高価なことである。

【0018】公知の浮上高試験法についての前述した重

要な欠点に加えて、従来方法のすべてが有しているもう一つの問題は、反射時にスライダーの表面に起こる位相の変化である。この位相の変化は浮上高の変化と間違っ

て受け取られやすく、20nmに及ぶエラーを引き起こすこともある。この影響を訂正するために、材料の合成屈折率についての理論的知識を用いてこの位相の変化を正確に知る必要がある。OFHTが多数の波長を用いている場合、これらの波長それぞれについて独立して合成屈折率を測定する必要がある。例えば、シー・レイシー、アール・シーラーおよびエイ・コーミアによる論文「ディスク/スライダー間隔の干渉計による測定：反射時の相シフトの影響 (Interferometric measurement of disk/slider spacing: The effect of phase shift on reflection)」[アイイーイーイー トランザクション オン マグネティックス (IEEE Transaction on Magnetics)] 参照。屈折率を独立して測定する必要性は、光学的浮上高試験の従来の方

法と手段すべてに大きな負担となる。

【0019】多くの場合、この屈折率はエリプソメーター (楕円偏光計: ellipsometer) としてこの分野で公知の独立した装置によって測定される。エリプソメーターは試験対象の物質 (被験物体) の表面から斜角で反射した光線の偏光の変化を分析するものである。この測定のジオメトリー (geometry) は従来のすべての浮上高測定のジオメトリーとは大幅に異なっているので全く別の装置が必要である。アール・エフ・スパニアによる論文「エリプソメトリー、1世紀の歴史をもつ新しい技術 (ellipsometry, a century old new technique)」[インダストリアルリサーチ (Industrial Research)、1975年9月] によれば、エリプソメーターとは、試験表面に斜角で入射する光線の偏光の変化を測定するためにデザインされた偏光子、リターデーションプレート、検出器からなる装置である。エリプソメーターは表面の合成屈折率についての情報を提供し、また基板上に堆積した薄膜のような多層媒体についての情報も提供できる。市販のエリプソメーターにはイリノイ州シカゴのガートナー サイエントフィック社 (Gaertner Scientific Corporation) が製造しているものがある。従来例には、合成屈折率の高速測定のために設計されたものを含む実験的なエリプソメーターの例が幾つかあるが、これらの装置のいずれも光学的浮上高試験と同様のわずかな隔たりの測定のために設計されたものはない。したがって、合成屈折率の測定は隔たりの測定とは別の仕事になる。

【0020】例えば、ティー・スミスによる論文「自動走査エリプソメーター (an automated scanning ellipsometer)」[サーフィス サイエンス (Surface Science) 56, 212-220 (1976年)] には、可動部がないエリプソメーター装置が記載されている。光は被験物体の表面に斜角で入射する。反射光線の空間的に

全く異なる部分のサンプルを取るため2つのビームスプリッターが備えられる。ビームスプリッターの一方は入射平面に対し垂直および平行な偏光を分離し、他方は入射平面に対し45°の角度に置かれる。様々な光線が光検出器によって測定され、3つの数学的式からなる体系に基づくデータ処理によって被験物体の表面の特徴を示す、エリプソメーターによる適切なパラメーターが得られる。開示された装置は高速度で働くが、光学的浮上高試験のようなわずかな隔たりを測定するのには向いていない。重要な問題は、光線の空間的なサンプリングであり、これはエラーの原因となり、追加レンズや同様の集束部材を用いたとしても集束した光線には使用できない。さらにこの論文には片方が実質的に透明な2つの部材の隙間の距離を高速度および高精度で測る方法についての教示はない。最後に、透明ディスクに近接しているスライダABSのように、ごくわずかな隔たりによってもう一方から離れている表面の合成屈折率を測定する方法については教示がない。したがって、スミスが記載した装置は隔たりと合成屈折率を独立して測定する問題を解決していない。

【0021】高速エリプソメーターには信号を生成するヘテロダイン干渉計を用いるものがある。エイチ・エフ・ヘイズブルークとエイ・エイ・ホルシャーによる論文「干渉計エリプソメトリー (interferometric ellipsometry)」[J. Phys. E: Sci. Instrum. 6, 822-6 (1973年)]には、ミシェルソン (Michelson) 干渉計と走査逆反射体に基づいた特殊ダブルパスエリプソメーターが記載されている。試験表面が平面反射鏡と共に干渉計の一方のアームに置かれ、逆反射体は他方のアームに置かれる。走査逆反射体は干渉計中の2つの直行する偏光についてうなり周波信号を生成する。これらの信号は光電的に測定され、その相対位相と振幅によって適切なエリプソメーター定数が得られる。幾分異なる構造の干渉計エリプソメトリーがシー・リン、シー・チューおよびケイ・チャンによる論文「光学的ヘテロダインと位相ロックイン技術による実時間干渉計エリプソメトリー (Real time interferometric ellipsometry with optical heterodyne and phase lock-in techniques)」に記載されている。この論文はうなり周波信号を生成するために2つの音響光学変調器とマッハツェンダージオメトリーを伴う光学的ヘテロダイン技術を開示している。しかし、これらのヘテロダインエリプソメーターのいずれも、一方が実質的に透明な部材である2つの部材の隙間の距離を高速度、高精度で測定するには設計されていない。また、透明ディスクに近接しているスライダABSのようなごくわずかな隔たりによってもう一方の表面から離れている表面の合成屈折率を測定する方法について、これらの論文には教示がない。したがって、ヘイズブルークとホルシャー記載の装置、リン記載の装置のいずれも隔たりと合成屈

折率の独立測定という問題を解決しない。

【0022】さらに別のタイプのゼーマンレーザーを利用する干渉計エリプソメーターがある。エル・シンガー、エイ・ブランフェルド、ジェイ・シャーマによる論文「安定化ゼーマンレーザーを用いたエリプソメトリー (ellipsometry with a stabilized Zeeman laser)」に開示されたこのタイプは、分析器の手動回転を伴っているため厳密には高速度装置とはいえない。ジー・グレンへの米国特許第4,762,414号に開示のタイプはヘテロダイン信号を生成するが1回に1つの偏光を測れるだけで、干渉計の基準支柱を機械的温度的影響から保護する必要性というまた別の問題を抱える。これらの装置は従って光学的浮上高試験で必要とされるような2つの部材の隙間の距離の高速、高精度測定には適さない。

【0023】ディー・ビー・ピリプコとアイ・ピー・ブガックによる論文「干渉エリプソメーター (interferometric ellipsometer)」[インストルメンツ アンド イクスペリメンタル テクニクス 26 (4) 951-952 (1984年)]に、被験物体の表面に多数パスを行う特に珍しい型の干渉計エリプソメーターの記載がある。開示された装置は走査ファブリペロー干渉計に基づいている。この珍しい多数パスジオメトリーはエリプソメーターによるデータを抽出するための信号処理の段階を幾つか簡素化する。しかし、この装置と方法は光学的浮上高試験で必要とされるような2つの部材の隙間の測定には特に適さない。

【0024】エリプソメーターには特定の用途または特殊な表面にしか適さない型がある。例えば、米国特許第5,170,049号には基板上のクロム層の酸化クロム被覆の厚さを測るためだけの特殊エリプソメーターの開示がある。ジェイ・シー・チャスタン、ダブリュー・ダブリュー・ヒルデンブランドおよびエム・レパノニへの欧州特許第EP0075684A1に別の特殊干渉計エリプソメーターの例が開示されている。このシステムは2つの直交する偏光の強さのみを測定するもので、それ故わずかな測定エラーに非常に影響されやすく、入射角が45°の場合全く機能しない。明らかにこれらの従来技術のいずれからも光学的浮上高試験でのわずかな隔たりという問題を解決する示唆はないし、また浮上高とスライダABSの合成屈折率との独立測定を避ける方法も示唆しない。

【0025】したがって、従来技術は合成屈折率の独立測定に頼らない浮上高測定の方法も手段も提供しないと結論できるであろう。それ故、OFHTや同様の隔たり測定装置における主な問題点は、合成屈折率の測定が隔たり測定から独立した仕事であり、エリプソメーターまたは同様の装置を必要とすることである。この必要性によって、わずかな隔たりの測定はかなり複雑かつ経費のかかるものとなり、その一方で試験結果の信頼性のレベ

ルは落ちることになる。

【0026】したがって、光学的浮上高試験で必要とされるような2つの部材の隙間の距離の高速、高精度測定のための装置と方法の必要性はまだ満たされていない。従来技術で起こった問題には、極端に狭い隔たりすなわち近接近の測定ができないこと、多数の波長を用いる必要があること、それに伴って光源や検出器部品が複雑になること、いくつかの方法で空気の流れや機械的な歪みの影響を受けやすいこと、エリプソメーターを用いて合成屈折率を独立して測定する必要があること、等が含まれる。これらの欠点はこの発明によって克服される。

【0027】この発明は、このような事情を考慮してなされたもので、2つの部材の隙間の距離を高速度および高精度で測定する方法および装置を提供するものである。

【0028】

【課題を解決するための手段】この発明は、実質的に透明な部材の表面からそれに極めて近接した被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定方法であって、関連する直交基準ベクトル s を有する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有し、前記透明な部材の表面に10 入射しかつ s 型および p 型の偏向が双方に存在するような偏向を有する偏光ビームを前記透明な部材の表面に斜めの角度で向ける工程と、前記透明な部材を通過させて前記偏光ビームを反射させ、互いの相対的な位相とそれに関連する振幅とを有するベクトル s とベクトル p の偏光成分からなる反射ビームを得る工程と、前記反射ビーム中における反射されたベクトル s とベクトル p の偏光成分を互いに干渉させて前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、前記相対的な位相とそれ20 に関連する振幅の情報に基づいて前記透明な部材の表面から前記被験物体の表面までの距離を決定する工程とからなる光学的隙間測定方法である。

【0029】この発明において、2つの部材の表面の内、第1表面と呼ぶ一方の表面は実質的に透明な部材の表面であり、もう一方の表面は被験物体の表面である。この2つの部材の表面は空気のような透明な媒体によって分離されており、その間の隔たりは使用する光の波長より短いのが典型である。被験物体の表面は透明な部材の表面に極めて近接、例えば透明な部材の表面に接触するかまたはほぼ接することができる。また、被験物体の表面は透明な部材の第1表面に対し静止していてもよいし動いていてもよい。

【0030】この発明においては、透明な部材の第1表面に斜めの角度で偏光光ビームが向けられる。光ビームの入射平面は偏光基準ベクトル p を規定し、このベクトルに直交基準ベクトル s が関連する。入射光ビームの偏光は s 型及び p 型の両方の偏光が存在するものである。

【0031】光ビームは、透明な部材の第一表面からの反射と被験物体の表面からの反射との組み合わせ効果に

よって透明な部材を通して反射される。次に反射光ビームの2つの偏光である s と p を、光検出器またはその幾つかの組み合わせの上で互いに干渉させ、2つの反射偏光成分の相対的な位相並びにその振幅についての情報を得る。本発明の方法において、この情報は反射光線を2つ以上の等しい光線に分け、各光線が偏光光学部材を通過して光検出器に達することによって得られる。次に、電子工学処理手段が光検出器からの信号を用いてこの2つの偏光の振幅と相対的な位相を計算する。次いでコンピューターが干渉計分析によって得られた情報を用いて2つの部材の表面間の隔たりの大きさを計算する。

【0032】本発明は、また、被験物体の表面の合成屈折率を測定する方法および装置を提供する。この方法は透明な部材の第一表面と被験物体の表面との隔たりを光源の波長にほぼ等しいか又はそれ以上の範囲にわたって変化させることにより行う。この変化は被験物体の表面の位置を調整する機械的手段または2表面間の隔たりの大きさを規定するその他の物理的パラメーターの変更によって実行することができる。隔たりの大きさが変更されている間に、干渉計データが高速で取得される。コンピューターは、振幅および位相情報についての最大値、最小値のようなデータを記憶し、このデータを用いて被験物体の表面の有効な合成屈折率を計算する。

【0033】本発明は、また、被験物体の表面の境界 (boundary) に対する測定ビームの被験物体の表面上での位置を測定する方法および装置を提供して、意味のある繰り返し可能なギャップの測定を提供する。この装置は、白熱球や光照射ダイオード等の光源と、光学システムと、電子カメラと、その電子カメラの信号から画像を形成する手段から構成される。光ビームは透明な部材を通過して斜めの角度で向けられる。あるいは明視野顕微鏡の分野における技術者にとっては公知の方法で、光ビームを光学顕微鏡を通して透明な部材に実質的に垂直入射で向けてもよい。光学顕微鏡を用いた場合、透明な部材の表面と被験物体の表面との双方から反射してカメラ上に像が形成されている光ビームを用いて、被験物体の表面から反射した光の像をカメラ上に形成する。同時に、被験物体の表面の境界 (boundary) に対する測定点の位置が可視的あるいは電子工学的に決定できるように、前述の測定ビームの一部の画像もカメラ上に形成する。光学顕微鏡を用いた場合、斜角で入射する測定ビームの位置は被験物体の表面によって散乱して顕微鏡にまで達し、カメラ上に像を結ぶ。このようにして、この装置は、被験物体の表面の境界 (boundary) に対する測定点の位置を示す。コンピューター処理を含む本発明の上記およびその他の特徴、好ましい実施例の詳細、実行方法は、下記の実施例を添付図面と共に読めばより明らかになる。

【0034】また、この発明は、被験物体が透明な部材からなる場合には、実質的に不透明な部材の表面からそ

れに極めて近接した実質的に透明な被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定方法であって、関連する直行基準ベクトル s を有する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有し、前記透明な被験物体の表面に入射しかつ s 型および p 型の偏向が双方に存在するような偏向を有する偏光ビームを前記透明な被験物体の表面に斜めの角度で向ける工程と、前記透明な被験物体を通過させて前記偏光ビームを反射させ、互いの相対的な位相とそれに関連する振幅とを有するベクトル s とベクトル p の偏光成分からなる反射ビームを得る工程と、前記反射ビーム中における反射されたベクトル s とベクトル p の偏光成分を互いに干渉させて前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報を得る工程と、前記相対的な位相とそれに関連する振幅の情報に基づいて前記不透明な部材の表面から前記透明な被験物体の表面までの距離を決定する工程とからなる光学的隙間測定方法である。

【0035】さらに、この発明は、実質的に透明な部材の表面からそれに極めて近接した被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定装置であって、直行基準ベクトル s に関連する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有する偏光された入射光ビームであり、前記 s 型と p 型との双方の偏向が存在し、前記透明な部材を通過して反射されて、 s と p の反射偏向成分からなる前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面との合成反射率を有する反射ビームとなって、その合成反射率が偏向状態に応じて変化し、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化が前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離の関数となるような偏光された入射光ビームを斜めの角度で前記透明な部材の表面に向けて与える手段と、前記反射ビームの偏向成分を混合してその偏向成分の相対的な強度と前記 s と p の偏向成分間の位相差との干渉効果特性を得ることで、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報を得る手段と、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報に基づいて前記透明な部材の表面と前記被験物体の表面間の距離を決定し、それによって前記透明な部材の表面から前記被験物体の表面までの距離を高速かつ正確に測定することを特徴とする光学的隙間測定装置である。

【0036】また、この発明は、被験物体が透明な部材からなる場合には、実質的に不透明な部材の表面からそれに極めて近接した実質的に透明な被験物体の表面までの距離を測定する光学的隙間測定装置であって、直行基準ベクトル s に関連する偏光基準ベクトル p を形成する入射平面を有する偏光された入射光ビームであり、前記 s 型と p 型との双方の偏向が存在し、前記透明な被験物体を通過して反射されて、 s と p の反射偏向成分からなる前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面との合成反射率を有する反射ビームとなって、その合成反射率が偏向状態に応じて変化し、前記 s と p の偏向成

分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化が前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離の関数となるような偏光された入射光ビームを斜めの角度で前記透明な被験物体の表面に向けて与える手段と、前記反射ビームの偏向成分を混合してその偏向成分の相対的な強度と前記 s と p の偏向成分間の位相差との干渉効果特性を得ることで、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報を得る手段と、前記 s と p の偏向成分の相対的な位相と各偏向成分の光量の変化との情報に基づいて前記不透明な部材の表面と前記透明な被験物体の表面間の距離を決定し、それによって前記不透明な部材の表面から前記透明な被験物体の表面までの距離を高速かつ正確に測定することを特徴とする光学的隙間測定装置である。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、図面に示す実施例に基づいてこの発明を詳述する。なお、これによってこの発明が限定されるものではない。

【0038】図1は回転する透明なディスク20からそのディスク20にほぼ接している被験物体（以下単に「物体」という）30までの距離を測定する干渉計機構を用いたこの発明の実施に用いる装置の好ましい実施例である。この実施例の装置は、回転する磁気記憶媒体のようなディスク20の表面におけるスライダのような被験物体30の空力フライト特性を決定するのに適している。この装置は、回転する透明なディスク20の表面25と被験物体30の表面35との表面間（隙間）の距離を測定するようになっている。ディスク20は、図に示すように、モータ22で駆動される軸21に取り付けられていることが望ましく、隙間の距離がディスク20の回転速度の関数として求められてもよい。被験物体30と軸21との位置関係については、ディスク20の上面と被験物体30の位置とを示した図2によってさらに詳細に示されている。図2においては、被験物体30が、例えばスライダ11によって支持された磁気ヘッド10から構成されている場合を示している。

【0039】図1に示すように、測定用照明としては光源1を用いる。光源1には、発光ダイオード、気体レーザー、放電ランプ、その他の光源を用いてもよい。レンズ3は、偏光部材4の方向に光ビーム2を向ける。偏光部材4には、ダイクロイック直線偏光子などを用いてもよい。偏光された光ビーム5は、ディスク20の第1面（裏面）に斜めから入射することが好ましい。光ビームの入射面は、直行基準ベクトル s とそれに関連する偏光基準ベクトル p を規定することが好ましい。光ビーム5は、 s 型偏光ベクトルと p 型偏光ベクトルがいずれも存在するように偏光することが好ましい。

【0040】図1に示すように、光ビーム5は、ディスク20を介して光ビーム6として反射することが好ましい。反射した光ビーム6は、ディスク20の表面25か

らの反射と物体30の表面35からの反射が組み合わされて生じるものである。この2つの面25と面35からの反射は、光ビーム5の偏光によって左右され、2つの偏光sと偏光pの相対的な位相とそれぞれの偏光の光量とが変化する。位相と光量のこうした変化は、部分的には、面25と面35との隔たりの関数となっている。この発明の装置は、それぞれの偏光の光量を測定する偏光感知強度メータ（以下単に「強度メータ」という）12と、偏光sと偏光pとの位相差を求める位相検出器13をさらに備えることが好ましい。この発明の好ましい実施例では、レンズ7と、着脱可能な偏光部材14と、ビームスプリッター8をさらに備えることが好ましい。この偏光部材14は、図3に詳細に示すように、強度メータ12と位相検出器13の正確な操作を調整し確認するものであり、これには偏光子や波長板を用いてもよい。

【0041】図3に好ましい例として示すように、ビームスプリッター101は、反射光ビーム6を、光ビーム102と光ビーム103に分けるものである。強度メータ12は、ウォラストンプリズムや偏光ビームスプリッターのような偏光部材110を備えることが好ましい。この偏光部材110は、光ビーム102の偏光sと偏光pを分離させて、光検出器111と光検出器112に照射する。これらの光検出器により測定された光強度は、コンピュータ99（図1参照）に電子的に伝達されることが好ましい。

【0042】図3に示すように、位相検出器13では、光ビーム103は、さらに光ビーム104と光ビーム105とに分けられることが好ましい。ウォラストンプリズムのような偏光部材120は、光ビーム104の2つの偏光sと偏光pを合わせて2つの光ビーム106と光ビーム107を形成する。これらの光ビームは、互いに直交するように偏光されている。こうして偏光部材120が2つの偏光を合せることによって、これらの偏光の相対強度の干渉効果や偏光間における相対位相が生じるとともに、偏光部材120が正確に配向するなどの結果がもたらされることが好ましい。光ビーム106と光ビーム107の強度は、2つの光検出器122と光検出器121によってそれぞれ測定されて、その電気信号がコンピュータ99（図1参照）に渡されることが好ましい。

【0043】光ビーム105は、例えば4分の1波長板であってもよい波長板123を通過することが好ましい。波長板123は、2つの偏光sと偏光pの相対位相をシフトする効果を有することが好ましい。ウォラストンプリズムのような第3の偏光部材130は、光ビーム105の2つの偏光sと偏光pを合わせて2つの光ビーム108と光ビーム109を形成する。これらの光ビームは、互いに直交するように偏光されている。こうして偏光部材130が2つの偏光を合せることによって、これらの偏光の相対強度の干渉効果が生じることが好ま

い。光ビーム108と光ビーム109の強度は、2つの光検出器132と光検出器131によってそれぞれ測定されて、その電気信号がコンピュータ99（図1参照）に渡されることが好ましい。

【0044】光検出器111、112、121、122、131、132には、それぞれ、個別検出器、直線配列検出器または2次元配列検出器を用いてもよいことが、この分野の技術者であれば理解できるであろう。この発明の範囲内で他の検出手段を用いてもよいことも、この分野の技術者であれば理解できるであろう。例えば、この実施例では、偏光部材と多重検出器を備えた形態の位相検出器を特に用いているが、他の形態の位相検出器を用いてもよい。この方法に適した別の位相評価法としては、ピー、ハリハラン著の「干渉計の基礎 (Basics of Interferometry)」アカデミック プレス (Academic Press)、ボストン、1992年の70、71、73および189頁に記載のヘテロダイン干渉計が挙げられる。

【0045】図4はこの発明の他の実施例を示すものである。この実施例では、通常の入射システムにおいて被試験面上で被験物体を観察し、測定点の位置を求めるための顕微鏡200を設けているが、図8に示すこの発明のもう1つの他の実施例では、図4の垂直入射システムと反対のインライン光学システムにおいて被試験面上に測定光ビームが照射される。図4において、光源201からの光202は、顕微鏡200のビームスプリッター203を介してレンズ204に照射されて、被験物体から反射され、閉回路のテレビカメラ210の感光面に当たることが好ましい。カメラ210からの電子画像は、ビデオモニター220で観察するか、コンピュータ99（図1参照）に渡しさらに処理してもよい。

【0046】図8はこの発明のもう1つの他の実施例を示すものである。この実施例では、オンライン光学システムにおいて被試験面上で被験物体を観察し、測定点の位置を求めるための観察システムを設けている。図8では、そこに好ましい例として示したように、図4と同じ構成要素には、「a」を後に付した以外は図4と同じ参照番号を付している。この実施例では、拡散光源201aには、白熱電球、発光ダイオードなどを用いてもよく、この拡散光源201aの光をビームスプリッター203aによって光源の光ビーム2aに合わせる。光源201aからの光は被験物体30aの表面35aを照射した後、ディスク20aを通過して反射される。光源201aから放出された光の一部は、ビームスプリッター204aに反射してカメラ210aに導かれる。同時に、ビームスプリッター204aは、光源1aから放出された光ビームの一部も反射する。電子信号がカメラ210aから渡されてビデオモニター220aに画像230aとして表示される。光源1aからの光ビームは面35a

に結像され、画像230aにおいて、面35a上の測定

位置に対応する明点が形成される。すなわち、拡散光源 201a からの光によって面 35a の相当の面積が照明されることにより、面 35a の相当の部分が明瞭な画像となる。この分野の技術者であれば、画像処理手段を設け、面 35a 上の物理的特徴に基づいて点 240a の位置を自動的に求めることは理解できるであろう。

【0047】さらに、この分野の技術者であれば、他の手段や方法を用いることによって、被試験面上で被験物体を観察し、測定点の位置を求めることも可能なことが理解できるであろう。なお、照明と電子撮像には、図 4 に示すような顕微鏡などの、垂直入射角または斜角で動作するほぼ独立した光学システムを用いてもよい。こうした独立光学手段では、測定点を求めるとも、被験物体 30a のローディングを容易にする独立処理手段を設けてもよい。さらに、この独立処理手段に、面 35a と面 25a との間の隔たりを分析する補足分析機能を持たせ、隔たりについての測定を確認するか、その範囲を増大するかできるようにしてもよい。独立光学手段は、前述したような、干渉色を生じる先行技術の光源を用いた顕微鏡で構成してもよい。

【0048】この発明の装置の好ましい実施例についての記載は以上のとおりであり、以下に、この発明の好ましい測定方法について説明する。図 1 では、偏光光ビーム 5 は、ディスク 20 を通過して入射角 $\phi \neq 0$ の角度で被験物体 30 を照明することが好ましい。好ましくは、光ビーム 5 は、2つの直交する偏光要素 p と偏光要素 s *

$$z_s(\beta) = \frac{r_s + r'_s \exp(i\beta)}{1 + r_s r'_s \exp(i\beta)} \quad (4.)$$

上記式中の位相項 β は次式で与えられる。

$$\beta = 2kh \cos(\phi). \quad (5.)$$

【0051】反射率 r_s 、 r_p はディスク 20 の表面 25 の反射率であり、反射率 r'_s 、 r'_p は被験物体 30 の表面 35 の反射率を表す。位相 β は、波数 $k = 1/\lambda$ ※

$$I_{s,p}(\beta) = A''_{s,p} Z_{s,p}(\beta). \quad (6.)$$

【0053】上記式中において、

$$A''_{s,p} = |a''_{s,p}|^2 \quad (7.)$$

【数 8】

$$Z_{s,p} = |z_{s,p}|^2. \quad (8.)$$

【0054】図 5 と図 6 のグラフは測定強度の変化をディスク 20 の表面 25 から被験物体 30 の表面 35 までの距離（高さ）の関数として示すものである。位相検出器 13 によって、2つの偏光 s と偏光 p との位相差を求

$$\theta(\beta) = \arg[z_s(\beta)] - \arg[z_p(\beta)] + \xi. \quad (9.)$$

* (ただし、p は入射面と平行な要素を表す) に分けてもよい。このため、光ビーム 5 の電界ベクトルは次式で表すことができる。

$$\vec{E}^{(0)} = a_s \hat{s} + a_p \hat{p} \quad (1.)$$

式中、バー s およびバー p は、2つの偏光の単位ベクトルである。

【0049】反射光ビーム 6 は次式で表すことができる。

$$\vec{E} = z_s a'_s \hat{s} + z_p a'_p \hat{p} \quad (2.)$$

式中、 z_s 、 z_p はスライダークラス境界面の有効反射率である。

【0050】電界要素 a_s 、 a_p は、スライダークラスの上面を介したダブルパス伝導 (double-pass transmission) の効果、および極性依存性である他のいずれかの光学要素の効果を含む。有効反射率 z_s 、 z_p は次式で与えられる。

$$z_p(\beta) = \frac{r_p + r'_p \exp(i\beta)}{1 + r_p r'_p \exp(i\beta)}. \quad (3.)$$

【数 3】

【数 4】

30 ※ λ 、入射角 ϕ 、および表面 25 と表面 35 との距離 h に関連する。

【0052】図 3 では、反射光ビーム 6 は光強度メータ 12 によって分析される。光検出器 111 および光検出器 112 は次式で表すことが可能な光強度を測定する。

【数 6】

【数 7】

めることが好ましい。この位相差は次式で表すことができる。

【数 9】

上記式中において、

$$\xi = \arg(a'_r) - \arg(a''_p)$$

【0055】図7のグラフは相対位相の変化をディスク20の表面25から被験物体30の表面35までの距離(高さ)の関数として示すものである。位相検出器13は、図3に示した検出器121, 122, 131, 132で測定した強度の数学解析によって機能することが好ましい。この発明の好ましい位相測定法では、正確に π *

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \right)$$

【0056】この式は、当該技術では、位相評価用の「4段階アルゴリズム」(例えば、ダニエル マラカラ著「光学工場試験法(Optical Shop Testing)」、第2版、ワイリ(Wiley)、ニューヨーク、1992年の511頁参照)と称することも度々ある。この「光学工場試験法」では、位相評価に用いる他の周知のアルゴリズムについても取り挙げて詳細に記載している。

【0057】強度 $I_{s,p}(\beta)$ と位相 $\theta(\beta)$ (式(9.)参照)を組み合わせると、次式によって定義される範囲において、表面25と表面35との距離 h を明確に求めることのできる十分なデータが得られることが好ましい。

【数12】

$$0 \leq \beta < 2\pi.$$

(12.)

【0058】すなわち、コンピュータ99は、 $0 \leq \beta < 2\pi$ の範囲において、 I_s , I_p および θ の測定値を理論上の予測値(式(6.)および式(9.)参照)と比較することが好ましい。理論と実験が最も整合する β 値を用いて、距離 h (式(5.)参照)を求めることが望ましい。理論と実験をできるだけ整合させるための種々の方法が当該技術において知られている。現在のところ、この好ましい方法は、ダブリュー、プレス、エス、ツーコルスキー、ダブリュー、ベターリング、ビー、フラネリー著「Cにおける数値法(Numerical recipes in C)」1992年ケンブリッジ大学出版、第2版の659頁〜661頁に記載のリーストスクウェアズフィッティング(least-squares fitting)である。この発明の非常に有用な点は、接触に近い距離 h を、誘電材料を含む全ての材料について正確に測定することが可能である点である。通常の入射角での多波長強度測定に基づく先行技術では、特に誘電材料を用いて接触に近い距離を測定した場合、正確さを非常に欠いてしまう。

【0059】この分野の技術者であれば、測定、分析の際の主要パラメータとして、強度 $I_{s,p}(\beta)$ と位相 $\theta(\beta)$ に関連した他の測定パラメータも用いられることは理解できるであろう。例えば、位相検出器13の干渉現象のコントラストは、強度 $I_{s,p}(\beta)$ の積の平

【数10】

(10.)

* / 2ラジアンだけ位相分離した4つの干渉信号の配列に4つの強度が対応するように、偏光部材120、偏光部材130、波長板123が好ましくは選択、配置される必要がある。すなわち、偏光 s と偏光 p との位相差を次式で表すことができる。

【数11】

(11.)

方根の2倍に等しい。また、光検出器121, 122, 131, 132(図3参照)によって測定される強度の平均は、2つの強度 $I_{s,p}(\beta)$ の和に等しい。したがって、この発明の他の実施例では、図1および図3に示した強度メーター12は不要になり、位相検出器13によって得られたデータに全面的に基づくことが好ましい。この他の実施例に用いられる主要な測定パラメータは、相対位相、平均強度、および、フリンジコントラストである。

【0060】この分野の技術者であれば、ここに述べたデータ分析において、一連の光学要素、例えばレンズやビームスプリッターなどから構成されたこの装置自体が、図1に示した光ビーム5および光ビーム6の偏光状態を著しくは変更しないことを仮定していることが理解できるであろう。仮に、実際、こうした光学要素が測定光ビームの偏光状態を変更する場合には、光学要素が及ぼす測定パラメータへの影響は、必ず、最小限に抑えるか、データ処理の過程で考慮しなければならない。例えば、図1のレンズ7が応力複屈折の影響を完全には免れていないとすると、それによって光ビーム6の偏光状態が修正され、測定パラメータ $I_{s,p}(\beta)$ および $\theta(\beta)$ が影響されることになる。したがって、応力複屈折を最小限に抑えることができるように、レンズ7を選択、配置する必要がある。

【0061】この発明を実施する際にさらに配慮すべき点としては、図1に示したディスク20の応力複屈折の影響が挙げられる。ディスク20は、製造時の残留応力、このディスク20を軸21にクランプ止めする際の応力、または高速度回転による求心力によって複屈折を有することがある。これらの原因より生じる影響は、最小限にするか、データ処理時に考慮されなくてはならない。

【0062】この発明の好ましい実施例では、また、表面35の合成屈折率を求めるための方法と手段が提供される。この方法では、少なくとも2ラジアンの量 β の変更に対応する範囲において、表面25と表面35の2つの表面間(隙間)の距離を変更することが含まれること

が好ましい。図1では、機械アーム31を用いて被験物体30をディスク20に対して保持している。機械アーム31は、商業的浮上高試験システムに用いられるようなローディング機構32によって作動されることが好ましい。通常の使用では、ローディング機構32は、被験物体30を、光源の1波長以上の距離から表面25に実質的に垂直な方向に沿って徐々に移動させ、ディスク20にほぼ接触させる。この工程は、当該技術では通常、「ローディング」と称されている。この発明の好ましい方法は、被験物体30をディスク20にローディングする工程中に、以下の量、すなわち偏光pの強度、偏光s*

$$u_{s,p} = \frac{\sqrt{I_{s,p}^{\max}} - \sqrt{I_{s,p}^{\min}}}{\sqrt{I_{s,p}^{\max}} + \sqrt{I_{s,p}^{\min}}} \quad (13.)$$

【0064】さらに、次式のように他の2つの量 $\gamma_{s,p}$ ※【数14】を定義する。

$$\gamma_{s,p}^2 = 4R_{s,p} + u_{s,p}^2(1 - R_{s,p})^2, \quad (14.)$$

この式中、 $R_{s,p}$ は、表面25の既知の反射率である。★る。

【0065】次に、表面35の反射率を次式から計算す★ 【数15】

$$R'_{s,p} = \left[\frac{-u_{s,p}(1 - R_{s,p}) \pm \gamma_{s,p}}{2\sqrt{R_{s,p}}} \right]^2 \quad (15.)$$

【0066】次いで、偏光sとpの位相差 α_Δ を次式から計算する。☆ 【数16】

$$\alpha_\Delta = \frac{1}{2}(\theta^{\max} + \theta^{\min}) \quad (16.)$$

【0067】次に、次式によりそれに応じた量を定義する。◆ 【数17】

$$\rho' = \sqrt{\frac{R'_p}{R'_s}} \exp(-i\alpha_\Delta) \quad (17.)$$

【0068】そして、次式から合成反射率 n' を計算する。＊ 【数18】

$$n' = \tan(\phi) \sqrt{1 - \frac{4\rho'}{(1 + \rho')^2} \sin^2(\phi)} \quad (18.)$$

【0069】以上の数学的手順は表面35の合成屈折率 n' を計算するためのものであり、図1の光ビーム5の入射角 ϕ が、ディスク20のブルースター角に近似ではあるが等しくはないとみなしている。ディスクの屈折率 n_s の適切な角度としては、例えば、 50° にほぼ等しい ϕ であることが好ましい。

【0070】この分野の技術者であれば、ローディング 50

＊の強度、これら2つの偏光の位相差 θ の最大値、最小値を検出し、かつ記録することからなることが好ましい。こうして得られた最大値、最小値は、符号 $I_{s,p}^{\max}$, $I_{s,p}^{\min}$, θ^{\max} , θ^{\min} で表すことができる。これらの値を、図1のコンピュータ99で処理し、数学的手順に基づいて合成屈折率を求めることが好ましい。その数学的手順を以下に詳述する。

【0063】まず、次式のように2つの量 $u_{s,p}$ を定義する。

【数13】

※【数14】

★る。

【数15】

☆【数16】

◆【数17】

＊【数18】

中に得られたデータを用いて合成屈折率 n' を求める別の処理方法も、この発明の精神から逸脱しない限り可能であることは理解できるであろう。例えば、別の手順は、浮上高の範囲に関して理論と実験が可能な限り整合するまで、合成屈折率 n' の値を増分調節することに基づいていることが好ましい。さらに、他の実施例では、浮上高の範囲に関して理論と実験が可能な限り整合する

27

まで、式(17.)の比 $\sqrt{R_{\phi}}'/\sqrt{R_{\phi}}'$ を調節することが含まれることが好ましい。これら2つの他の実施例では、合成屈折率 n' の値のなんらかの初期評価が必要とされる。初期評価は、上に概要を示した手順にしたがって、材料の公知の物性や最大値、最小値

$$r_s' = \frac{\tan(\phi - \bar{\phi})}{\tan(\phi + \bar{\phi})} \quad (19.)$$

【数20】

$$r_p' = -\frac{\sin(\phi - \bar{\phi})}{\sin(\phi + \bar{\phi})} \quad (20.)$$

この式中、 ϕ は入射角であり、 $\bar{\phi}$ は、以下に示すスネルの屈折法則から計算可能な(合成)屈折角である。※

$$n' \sin(\bar{\phi}) = \sin(\phi), \quad (21.)$$

合成反射率 $r_{s,p}'$ は既知であるので、反射の位相変化によって表面間距離の測定が誤ることはない。

【0072】この分野の技術者であれば、この発明の精神から逸脱しない限り、この発明の実施例の態様において、いくつかの変形例が可能であることは理解できるであろう。例えば、この発明の浮上高試験の例では、磁気媒体で被覆された実際のディスク上に浮上する実質的に透明なスライダを用いることができる。他の態様としては、透明部材を複数の表面で構成し、被験物体の非連続的特徴を測定するようにしてもよい。さらに他の態様としては、透明部材を、静止しているか透明部材に極めて近接して移動している被験物体表面の外形を規定するための基準とするようにしてもよい。

【0073】以上述べられたこの発明の利点としては、単波長光源を用いて広い範囲にわたって高感度で2つの部材の隙間の距離を測定できること、実際の接触に近い面と面との間の非常に小さい隔たりを測定できること、被験物体の合成屈折率を測定しかつ補足できること、および気流や小さな力学的歪みを無視できること等が挙げられる。

【0074】

【発明の効果】この発明によれば、反射された偏光ビーム中の2つの偏光成分を干渉させ、相対的な位相と振幅の情報を得、それに基づいて透明な部材の表面から被験物体の表面までの距離を決定するようにしたので、一方が透明な2つの部材の表面間の距離を高速度および高精度で測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の光学的隙間測定装置の好ましい一実施例を示す説明図である。

【図2】実施例における透明ディスクの上面と被験物体の位置との関係を示した説明図である。

28

* $I_{s,p}^{\max}, I_{s,p}^{\min}, \theta^{\max}, \theta^{\min}$ から得られる。

【0071】好ましくは、合成屈折率を一旦求めた後、表面35の合成反射率 $r_{s,p}'$ を以下に示すフレネルの式から求める。

【数19】

※【数21】

【図3】実施例における光強度および位相検出装置の詳細を示す説明図である。

【図4】この発明の光学的隙間測定装置の他の実施例を示す説明図である。

【図5】光強度の変化をディスクの表面から被験物体の表面までの距離の関数として示すグラフである。

【図6】光強度の変化をディスクの表面から被験物体の表面までの距離の関数として示すグラフである。

【図7】干渉計測定した位相の変化をディスクの表面から被験物体の表面までの距離の関数として示すグラフである。

【図8】この発明の光学的隙間測定装置のもう1つの他の実施例を示す説明図である。

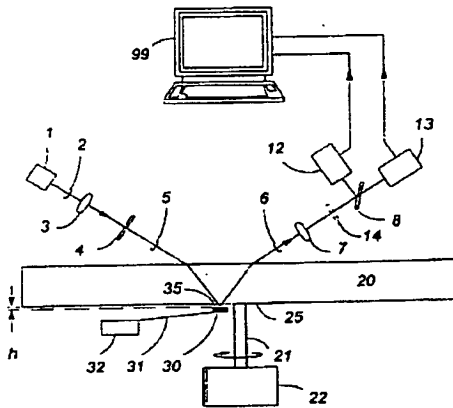
【符号の説明】

- 1, 1a 光源
- 2 光ビーム
- 3, 7 レンズ
- 4, 14, 110, 120, 130 偏光部材
- 5 偏光光ビーム
- 6 反射光ビーム
- 8, 101 ビームスプリッター
- 10 磁気ヘッド
- 11 スライダ
- 12 強度メータ
- 13 位相検出器
- 20, 20a ディスク
- 21 軸
- 22 モータ
- 25, 25a ディスクの表面
- 30, 30a 被験物体
- 31 機械アーム
- 32 ローディング機構

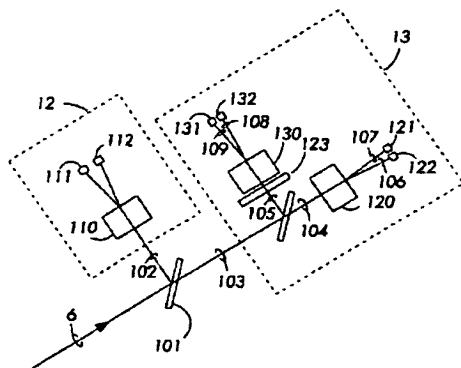
29

35, 35a 被験物体の表面
 99 コンピュータ
 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109 光ビーム
 111, 112, 121, 122, 131, 132 光検出器
 123 波長板
 200 顕微鏡
 201, 201a 拡散光源

【図1】



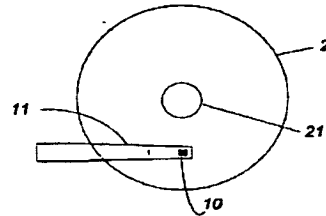
【図3】



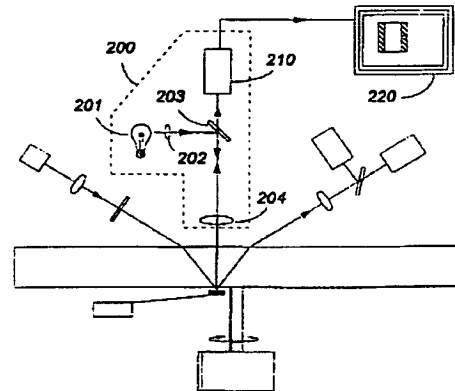
30

202 光ビーム
 203, 203a ビームスプリッター
 204 レンズ
 204a ビームスプリッター
 210, 210a テレビカメラ
 220, 220a ビデオモニター
 230a 画像
 240a 点

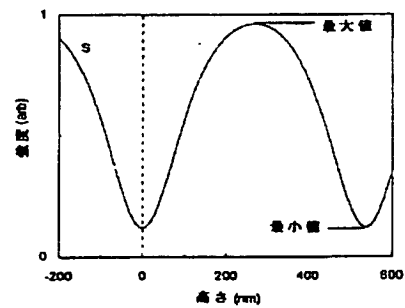
【図2】



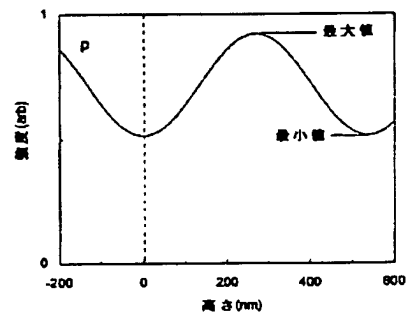
【図4】



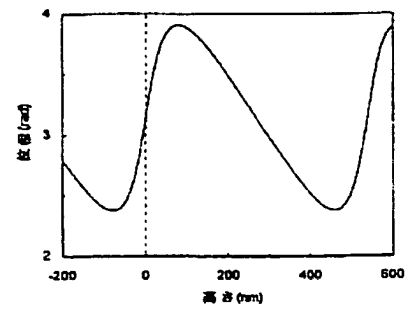
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

